博士导师新论

DOI:10.13193/j.issn.1673-7717.2025.09.001

植物乳杆菌发酵覆盆子工艺优化及挥发性风味物质分析

管咏梅[1,2],魏雯萍[1],杨鑫媛[3],赵松雪[3],李哲[1],臧振中[1],朱卫丰[1],陈丽梅[3,4]
(1.江西中医药大学现代中药制剂教育部重点实验室,江西 南昌 330004;
2.经典名方现代中药创制全国重点实验室,江西 南昌 330004;
3.江西中医药大学中医基础理论分化发展研究中心,江西 南昌 330004;4.江西中医药大学附属医院,江西 南昌 330004)

摘要:目的 以覆盆子为原料,优化植物乳杆菌发酵覆盆子的工艺条件。方法 以料液比、接种量、糖添加量、发酵时间为考察因素,以特征功能性成分总黄酮和总酚含量为评价指标,设计单因素和正交实验,筛选植物乳杆菌发酵覆盆子的最佳工艺条件,并对发酵前后的特征挥发性风味物质进行分析。结果 植物乳杆菌发酵覆盆子的最佳工艺条件为料液比1∶25 g/mL、接种量8%、糖添加量2%、发酵时间24 h。发酵前后样品中共检测到52种挥发性风味物质,其中8种醇类物质、4种酮类物质、12种醛类物质、7种酸类物质、7种酯类物质、6种烷烃类物质、3种酚类物质以及6种其他类物质。结论 发酵能有效提升覆盆子的风味和营养价值。

关键词:覆盆子;发酵;工艺优化;物质分析
中图分类号:R282.71 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-7717(2025)09-0001-06

Optimization of Fermentation Process of Fupenzi(Rubi Fructus) by *Lactobacillus plantarum* and Analysis of Volatile Flavor Substances

GUAN Yongmei[1,2],WEI Wenping[1],YANG Xinyuan[3],ZHAO Songxue[3],LI Zhe[1],ZANG Zhenzhong[1],ZHU Weifeng[1],CHEN Limei[3,4]
(1. Key Laboratory of Modern Preparation of TCM,Ministry of Education,Jiangxi University of Chinese Medicine,Nanchang 330004,Jiangxi,China;
2. State Key Laboratory of Innovative Medicine and High Efficiency and Energy Saving Pharmaceutical Equipment,Nanchang 330004,Jiangxi,China;
3. Research Center for Differentiation and Development of Traditional Chinese Medicine(TCM) Basic Theory,
Jiangxi University of Chinese Medicine,Nanchang 330004,Jiangxi,China;
4. Affiliated Hospital of Jiangxi Traditional Chinese Medicine University,Nanchang 330004,Jiangxi,China)

Abstract:*Objective* To optimize the fermentation conditions of Fupenzi(Rubi Fructus) by *Lactobacillus plantarum* using Fupenzi(Rubi Fructus) as the raw material. *Methods* Taking the ratio of material to liquid,inoculation amount,sugar addition amount and fermentation time as the investigation factors,and the contents of total flavonoids and total phenols as the evaluation indexes,the single factor and orthogonal experiments were designed to screen the optimum process conditions for the fermentation of Fupenzi(Rubi Fructus) by *Lactobacillus plantarum*,and the characteristic volatile flavor substances before and after fermentation were analyzed. *Results* The optimum conditions for the fermentation of Fupenzi(Rubi Fructus) by *Lactobacillus plantarum* were as follows:solid-liquid ratio 1∶25 g/mL,inoculation amount 8%,sugar addition amount 2%,fermentation time 24 h. A total of 52 volatile flavor substances were detected in the samples before and after fermentation,including 8 type of alcohols,4 type of ketones,12 type of aldehydes,7 type of acids,7 type of esters,6 type of alkanes,3 type of phenols and 6 type of other substances. *Conclusion* Fermentation can effectively improve the flavor and nutritional value of Fupenzi(Rubi Fructus).

Keywords:Fupenzi(Rubi Fructus);fermentation;process optimization;substantial analysis

---

基金项目:国家自然科学基金项目(82360812);江西省重点研发计划项目(20224BBG71023);江西省自然科学基金项目(20224BAB216108);江西省中医药标准化技术委员会标准化项目(2024A010);江西省卫生健康委科技计划项目(202510415)
作者简介:管咏梅(1979-),女,河南周口人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向:中药新制剂与新技术及食疗学。
通讯作者:陈丽梅(1985-),女,江西鹰潭人,讲师,硕士研究生导师,博士,研究方向:中药药理学、中药食疗学。E-mail:416325174@qq.com。

覆盆子(Rubi fructus)是蔷薇科植物华东覆盆子(*Rubus chingii Hu*)的干燥未成熟果实[1],最早收录于《神农本草经》中,名“蓬藥”,为上品[2],《名医别录》记载其具有“补虚续绝,强阴建阳,悦泽肌肤,安和脏腑,温中益力,疗劳损风虚,补肝明目”[3]的功效,现代药理学研究表明其具有抗肥胖[4]、抗氧化应激[5]、抗衰老[6]、抗癌[7]、抗炎[8]、抗菌[9]、神经保护[10]、抗骨质疏松症[11]、抗血栓[12]、降血脂、降血糖[13]等作用。此外,覆盆子还具有丰富的营养价值,其成熟果实红覆盆子是世界公认的第 3 代黄金水果[14],2002 年被列入《按照传统既是食品又是中药材物质名录》[15],2020 年被列为江西省中药材“赣食十味”品种之一[16]。我国覆盆子资源丰富,但其鲜果采摘周期短、储存与运输难度大且深加工产品种类有限,不能满足消费者多样化需求,存在较大市场空缺。

发酵是中药传统炮制方法之一。随着生活水平的提高,人们对健康饮食的关注增强,富含生物活性成分兼具食药两用功能的植物资源成为发酵产品开发研究的新热点。发酵过程中会产生多种酶系,有利于细胞壁中果胶、木质素等分解,能够促进中药有效成分的溶出,增强药物疗效;此外,微生物的代谢还能够增加中药活性物质的种类及含量,产生新的药效,扩大药用范围,降低药物毒性,提高中药资源的利用率,且在提高生物利用度方面起到了至关重要的作用[17]。通过乳酸菌发酵不仅能够提高中药的药效和营养价值,改善其风味口感,还可以在保留中药自身营养成分基础上,提高中药功能性成分的含量,增加多种功能因子,如黄酮类、多酚类物质等。覆盆子经发酵后,能够增加有机酸类、酚类及总黄酮类成分的含量[18],改善口感风味[19],拓展覆盆子的应用范围。

本研究以植物乳杆菌发酵覆盆子,以覆盆子发酵过程中总黄酮及总酚类含量变化为指标,优化发酵工艺,并对覆盆子发酵前后的挥发性风味物质进行分析,明确其风味物质变化,为覆盆子发酵产品开发、拓宽覆盆子的临床及市场应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

覆盆子,江西江中中药饮片有限公司,批号 210618;植物乳杆菌 HCS03 - 001(CGMCC No. 16258),江西仁仁健康微生态科技有限公司提供;葡萄糖,西陇科学股份有限公司,批号 231016;福林酚,上海源叶生物科技有限公司,批号 IS20855A;无水碳酸钠,上海阿拉丁生化科技股份有限公司,批号 K1822195;氯化铝罗恩试剂,批号 7784 - 13 - 6;没食子酸(gallic acid,GA),成都普菲德生物技术有限公司,批号 23101303;槲皮素(Quercetin,QUE),中国食品药品检定研究院,批号 10081 - 201610;甲醇(色谱级),安徽天地高纯溶剂有限公司,批号 24025172。

GI100TW 立式自动压力蒸汽灭菌器,致微(厦门)仪器有限公司;SW - CJ - 2FD 洁净工作台,苏州安泰空气技术有限公司;ZQWY - 218V 恒温振荡培养箱,上海知楚仪器有限公司;SIGMA3 - 18K 冷冻离心机,德国 sigma 公司;Tecan spark TM10 酶标仪,瑞士帝肯集团公司;BSA124S 分析天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;SB - 3200DTS 超声波清洗仪,宁波新芝生物科技股份有限公司;气相色谱 - 质谱联用仪(安捷伦 7890A 和 5975C),安捷伦科技公司,美国加利福尼亚州圣克拉拉。

1.2 实验方法

1.2.1 覆盆子发酵工艺流程 将覆盆子药材粉碎后过 3 号筛,药粉和水按一定比例混合,115 ℃,灭菌 20 min,待到覆盆子发酵基料冷却后,在超净工作台中加入灭菌的葡萄糖溶液,接种植物乳杆菌。温度控制在 37 ℃,转速 180 r/min 进行发酵,发酵结束后 8000 r/min,4 ℃,离心 2 次,每次 10 min,取上清液于 4 ℃保存。

1.2.2 单因素实验 通过预实验,确定以料液比(覆盆子:水)、接种量、葡萄糖添加量、发酵时间为主要影响因素,以总黄酮及总酚含量为考察指标,确定发酵因素水平。在料液比 1∶25 g/mL、接种量 8%、糖添加量 2%、发酵时间 36 h 的基础上进行单因素实验,以熵权 TOPSIS 综合评分[20-23]为考察指标进行分析评价,分别考察料液比(1∶15、1∶20、1∶25、1∶30、1∶35 g/mL)、植物乳杆接种量(4%、8%、12%、16%)、葡萄糖添加量(1%、2%、3%、4%)、发酵时间(18、24、36、48、60、72 h)对发酵覆盆子的品质影响,平行 3 次。

1.2.3 正交实验设计 通过正交实验进行 4 因素 3 水平的实验设计,进一步优化发酵工艺,以获得最佳发酵条件。因素及水平见表 1。

表 1 正交实验因素水平

水平	A 料液比/(g/mL)	B 接种量/(%)	C 糖添加量/(%)	D 发酵时间/(h)
1	1∶25	4	1	24
2	1∶30	8	2	36
3	1∶35	12	3	48

1.2.4 含量测定方法 (1)总黄酮含量的测定[24-25]:取槲皮素(quercetin,QUE)对照品适量,精密称定,加甲醇制成每 1 mL 含 0.306 mg 的对照品母液。分别吸取适量母液于 5 mL 量瓶中,用甲醇定容稀释,得对照品质量浓度分别为 0.015 3、0.030 6、0.045 9、0.061 2、0.076 5、0.091 8、0.107 1 mg/mL 的对照品溶液。

在 96 孔酶标板中加入对照品溶液 100 μL 和 2% $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ 甲醇溶液 100 μL,混匀,室温反应 15 min 后进行全波长扫描,选定 430 nm 测定吸光度值。以 QUE 浓度(mg/mL)为横坐标,吸光度值为纵坐标,绘制标准标曲。结果显示总黄酮含量在 0.015 3 ~ 0.107 1 mg QUE/mL 具有良好的线性关系。回归方程 $Y = 4.701\ 9X + 0.107$,$R^2 = 0.999\ 3$。

在 96 孔酶标板中加入 100 μL 样品和 100 μL 2% $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ 甲醇溶液混匀,室温反应 15 min 后在 430 nm 处测量吸光值,计算样品中总黄酮含量。

(2)总酚含量的测定[26]:取没食子酸(GA)对照品适量,精密称定,加水制成每 1 mL 含 0.996 mg 的对照品母液。分别吸取适量母液于 5 mL 量瓶中,用水定容稀释,得对照品质量浓度分别为 0.099 6、0.149 4、0.199 2、0.249、0.298 8、0.348 6、

0.398 4 mg/mL 的对照品溶液。

在 96 孔酶标板中加入对照品溶液 20 μL 和 0.2 mol/L 福林酚试剂 100 μL 混匀，静置避光反应 5 min 后加入 10% Na_2CO_3 溶液 80 μL，继续避光反应 30 min 后进行全波长扫描，选定 765 nm 测定吸光度值，以 GA 对照品浓度（mg/mL）为横坐标，吸光度值为纵坐标绘制标曲。结果显示总酚含量在 0.099 6～0.398 4 mg GAE/mL 范围内具有良好的线性关系。回归方程 $Y = 91.571X + 0.01$，$R^2 = 0.999\ 7$。

在 96 孔酶标板中加入 20 μL 样品稀释液和 0.2 mol/L 福林酚试剂 100 μL 混匀，静置避光反应 5 min，加入 10% Na_2CO_3 溶液 80 μL，避光反应 30 min 后测定 765 nm 处的吸光值，计算样品中总酚含量。

1.2.5 顶空气相色谱－质谱法测定挥发性风味物质[27－29] 发酵样品离心后取上清液于旋转蒸发仪 55 ℃减压浓缩，浓缩液置于培养皿中放入－20 ℃冰箱预冻 24 h，待浓缩液冷冻完全后进行真空冷冻干燥（冷冻干燥 48 h，冷冻温度－50 ℃，真空度 10～15 Pa）。将冷冻干燥好的冻干粉取出粉碎，取冻干粉 0.400 g 于干燥的 20 mL 顶空进样瓶中，压紧密封盖。采用顶空进样－气相－质谱联用色谱法（headspace gas chromatography－mass spectrometry，HS－GC－MS），未知化合物与美国科学和技术研究院 20（National Institute of Science and Technology/NIST 20. L）谱库进行对照，选择匹配度大于 80% 的物质，结合 CAS 号进行定性分析[30－31]。

（1）GC 运行条件：使用 Agilent 19091S－433：93.928 73HP－5MS 5% Phenyl Methyl Silox －60～325 ℃：30 m×250 μm×0.25 μm 色谱柱，初始温度 40 ℃（保持 3 min），以 2 ℃/min 升至 60 ℃（保持 2 min），以 8 ℃/min 升至 108 ℃（保持 2 min），再以 8 ℃/min 升至 220 ℃（保持 10 min）；进样量 1 μL；分流进样，进样口温度 200 ℃；总流量为 14 mL/min，分流比 10∶1，分流流量为 10 mL/min，柱流量为 1 mL/min；MSD 传输线温度 280 ℃。

（2）质谱条件：标准谱图调谐；EI 离子源；离子源温度 230 ℃；四级杆温度 150 ℃；数据采集模式为全扫描模式，质量范围为 45～800 m/z；EMV 模式为增益因子 1.00，EM 电压为 1565 V；溶剂延迟时间 1.60 min。

1.2.6 数据处理与分析 实验数据使用 Microsoft Excel、GraphPad Prism 9、IBM SPSS Statistics 27 软件进行统计分析，用 SPSSAU 软件进行熵权 TOPSIS 权重计算，进行正交分析。

2 结果与分析

2.1 料液比

由图 1 可知，随着料液比不断增加，发酵覆盆子综合评分逐渐升高，料液比达到 1∶30 g/mL 时，综合评分最高，选择料液比 1∶25、1∶30、1∶35 g/mL 作为发酵条件进行正交实验，进一步优化发酵工艺。

2.2 接种量

如图 2，随着接种量增加，综合评分呈先升后降趋势，接种量为 8% 时综合评分达到最高。当接种量小于 8% 时，发酵基料中有充足的营养物质能够供给植物乳杆菌生长繁殖，当活菌数超过一定限度后，营养物质供给不足，无法支撑植物乳杆菌充分增殖，导致评分降低，造成工业生产上的浪费。因此，选择接种量为 4%、8%、12% 作为发酵条件进行正交实验设计。

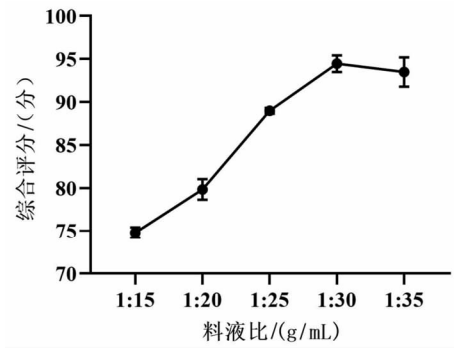


图 1 料液比对熵权 TOPSIS 综合评分的影响

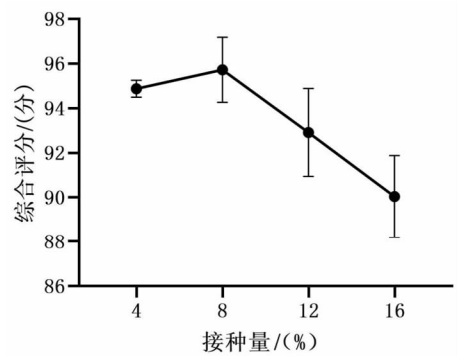


图 2 接种量对熵权 TOPSIS 综合评分的影响

2.3 糖添加量

如图 3，发酵覆盆子综合评分随着葡萄糖添加量的增加，呈先升后降趋势，在糖添加量 2% 时，发酵覆盆子综合评分最高，继续增加糖添加量，则综合评分降低。因此，选择糖添加量为 1%、2%、3% 进行正交工艺优化。

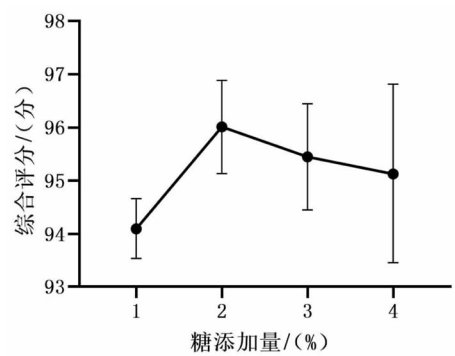


图 3 糖添加量对熵权 TOPSIS 综合评分的影响

2.4 发酵时间

由图 4 可知，在 18～36 h，综合 TOPSIS 评分随着发酵时间延长而提高，发酵时间为 36 h 时综合评分达到最高。菌种生长繁殖需要一定的周期，发酵时间过短导致菌种未得到充分生长繁殖；发酵时间过长，底物中营养物质消耗殆尽后菌种逐渐死亡，当发酵时间超过 36 h 后综合评分开始降低。因此，选择 24、36、48 h 进行正交工艺优化。

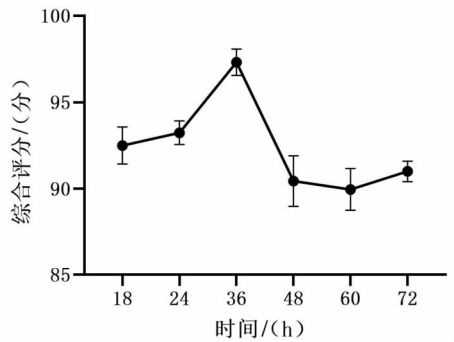


图 4 发酵时间对熵权 TOPSIS 综合评分的影响

2.5 正交实验结果

由表 2 极差分析可知,4 个影响因素按显著程度排序依次为料液比、发酵时间、接种量、糖添加量,即料液比对植物乳杆菌发酵覆盆子的影响最大,发酵时间次之,接种量影响较小,糖添加量的影响最小。极差分析最优方案为 $A_1B_2C_2D_1$,该组合不在正交实验设计组合中,故需对正交实验进行进一步验证。正交及极差分析结果见表 2。

表 2 覆盆子发酵工艺条件优化正交实验结果及分析

实验号	A 料液比	B 接种量/(%)	C 糖添加量/(%)	D 时间/(h)	总黄酮含量/(mg/g)	总酚含量/(mg/g)	综合评分/(分)
1	1	1	1	1	0.940	54.649	100.00
2	1	2	3	2	0.887	53.663	96.26
3	1	3	2	3	0.851	53.996	94.59
4	2	1	3	3	0.723	48.864	83.06
5	2	2	2	1	0.814	49.751	88.80
6	2	3	1	2	0.754	48.588	84.50
7	3	1	2	2	0.695	43.948	77.10
8	3	2	1	3	0.673	43.450	75.51
9	3	3	3	1	0.733	45.506	80.60
K_1	290.85	260.16	260.01	269.40			
K_2	256.36	260.57	260.49	257.86			
K_3	233.21	259.69	259.92	253.16			
k_1	96.95	86.72	86.67	89.80			
k_2	85.45	86.86	86.83	85.95			
k_3	77.74	86.56	86.64	84.39			
R	19.21	0.29	0.19	5.41			
最佳水平	1	2	2	1			
每水平重复数 r	3	3	3	3			

2.6 正交实验验证

按料液比 1∶25、接种量 8%、糖添加量 2%、发酵时间 24 h,平行重复 3 次,测得总黄酮含量为(1.013 ±0.015) mg/g,总酚含量为(57.030 ± 4.680) mg/g,RSD 分别为 1.47% 和 8.21%,均优于正交实验中任一组合的结果,说明该工艺稳定可行。

2.7 挥发性风味物质的测定

覆盆子发酵前后挥发性风味物质测定结果见表 3。由表 3 可知,通过 HS-GC-MS 在发酵前后样品中共检测到 52 种挥发性风味物质,发酵前特有成分 20 种,发酵后特有成分 13 种,其余 19 种为发酵前后共有的成分。发酵前后分别检测到 39 和 32 种挥发性风味成分。发酵前各类化合物比例分别为酯类 7 种(5.77%)、烷烃类 6 种(6.62%)、酮类 2 种(11.68%)、酸类 4 种(17.88%)、醛类 7 种(40.08%)、醇类 3 种(6.1%)、酚类 5 种(0.44%)以及其他物质 5 种(2.04%)。发酵后覆盆子中各类化合物比例分别为酯类 1 种(0.18%)、烷烃类 6 种(6.25%)、酮类 3 种(3.06%)、酸类 4 种(36.2%)、醛类 9 种(40.55%)、醇类 7 种(3.12%)以及其他物质 2 种(0.67%)。

覆盆子经植物乳杆菌发酵后,酸类物质含量显著提高,增加了 2.02 倍,新增了 3 种酸类成分,分别为 N,N-二甲基琥珀酸、亚甲基环丙烷-2-羧酸以及 L-乳酸,其中 L-乳酸占挥发性物质总量 30.43%,对覆盆子发酵液的风味贡献较大,是发酵覆盆子的特征香气成分之一。不良风味酸类物质(冰醋酸、丙酸、己酸)的含量降低了 70%,减少对覆盆子饮料风味的影响。发酵前后醛类物质占比无明显变化,但物质组成具有明显差异。与发酵前相比,发酵后覆盆子中增加了 4 种特有的醛类物质,为 2-甲基丁醛、苯甲醛、藏红花醛、乙醛乙基己基缩醛;此外,具有甜木香、杏仁香、烤面包混合气味的糠醛含量增加了 73%,增强了发酵覆盆子的香气,对覆盆子发酵液的风味贡献较大,是发酵覆盆子的特征香气成分之一。

此外,发酵后酮类以及醇类挥发性成分物质组成发生明显变化,酯类成分含量降低,烷烃类成分含量无明显变化。新产生的挥发性物质有酮类 2 种(3-羟基-2-丁酮、3-甲基-2-噁唑烷酮)、醇类 3 种(1,3-丁二醇、4-乙基-3-己醇、反-A,A-5-三甲基-5-乙烯基四氢化-2-呋喃甲醇)以及芳香烃类物质 1 种(1,3-二叔丁基苯)。

3 结论与讨论

黄酮类和酚类化合物是覆盆子主要活性成分,覆盆子中的黄酮化合物有椴树苷、金丝桃苷、槲皮素等,酚类化合物有鞣花酸、鞣花丹宁、花青素、没食子酸等,具有抗氧化、抗菌消炎、抗过敏、抗肿瘤等作用。王佩欣等[32]从不同产地覆盆子中提取分离了酚类化合物并证实其具有一定自由基清除及 α-葡萄糖苷酶活性抑制能力,具有良好的抗氧化和抗糖尿病潜力;邬玉芬等[33]证明覆盆子总黄酮具有较高的羟自由基和超氧阴离子自由基清除率。程丹等[34]从覆盆子中分离出黄酮类成分山柰酚、槲皮素和椴树苷,能明显延迟血液中血浆复钙时间发挥抗血栓作用。本研究以覆盆子和植物乳杆菌为原料,以黄酮类及酚类成分为质量评价指标进行含量测定,通过熵权 TOPSIS 法进行综合评价,通过单因素和正交实验设计对料液比、接种量、葡萄糖添加量及发酵时间等发酵工艺中的关键因素进行优化,确定了植物乳杆菌发酵覆盆子的最佳工艺,并对其挥发性风味物质进行分析。本研究得到覆盆子发酵最佳工艺参数为料液比 1∶25,植物乳杆菌接种量 8%,葡萄糖添加量 2%,发酵时间 24 h。优化后的发酵条件制得的覆盆子发酵品气味宜人,口感丰富、风味独特、营养成分的含量提高,总黄酮含量远远高于师聪等[35]测定的覆盆子总黄酮含量 0.61 mg/g。通过 HS-GC-MS 对覆盆子发酵前后的挥发性化合物进行检测,共检测出 52 种挥发性风味物质,L-乳酸、糠醛、2-甲基丁醛、5-甲基呋喃醛、1,3-丁二醇、3-羟基-2-丁酮、乙醛乙基己基缩

表3 植物乳杆菌发酵前后覆盆子发酵液挥发性风味物质种类及含量

No.	类别	CAS	分子式	化合物	气味特征	含量/(%)		变化趋势
						发酵前	发酵后	
1	酯类	599-04-2	$C_6H_{10}O_3$	D-(-)-泛酰内酯	棉花糖	0.47	-	-
2	酯类	131-11-3	$C_{10}H_{10}O_4$	邻苯二甲酸二甲酯	淡淡的芳香气味	0.13	-	-
3	酯类	17092-92-1	$C_{11}H_{16}O_2$	二氢猕猴桃内酯	香豆素气味	0.2	-	-
4	酯类	63038-10-8	$C_{12}H_{16}O_2$	洋川芎内酯		1.78	-	-
5	酯类	6415-59-4	$C_{12}H_{18}O_2$	瑟丹酸内酯	草药味	0.49	-	-
6	酯类	81944-08-3	$C_{12}H_{14}O_2$	(E)-藁本内酯		2.34	0.18	↓
7	酯类	17851-53-5	$C_{16}H_{22}O_4$	邻苯二甲酸-1-丁酯-2-异丁酯		0.36	-	-
8	烷类	556-67-2	$C_8H_{24}O_4Si_4$	八甲基环四硅氧烷		0.71	0.81	↑
9	烷类	541-02-6	$C_{10}H_{30}O_5Si_5$	环五聚二甲基硅氧烷		2.71	2.53	↓
10	烷类	540-97-6	$C_{12}H_{36}O_6Si_6$	十二甲基环六硅氧烷		1.47	1.83	↑
11	烷类	107-50-6	$C_{14}H_{42}O_7Si_7$	十四甲基环七硅氧烷		0.65	0.64	↓
12	烷类	556-68-3	$C_{16}H_{48}O_8Si_8$	十六甲基环辛硅氧烷		0.7	0.32	↓
13	烷类	556-71-8	$C_{18}H_{54}O_9Si_9$	十八甲基环壬硅氧烷		0.38	0.12	↓
14	酮类	513-86-0	$C_4H_8O_2$	3-羟基-2-丁酮	牛奶、黄油	-	0.16	+
15	酮类	497-23-4	$C_4H_4O_2$	2(5H)-呋喃酮	黄油	0.11	-	-
16	酮类	19836-78-3	$C_4H_7NO_2$	3-甲基-2-噁唑烷酮		-	0.19	+
17	酮类	28564-83-2	$C_6H_8O_4$	2,3-二氢-3,5二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮	焦糖	11.57	2.71	↓
18	酸类	64-19-7	$C_2H_4O_2$	冰醋酸	酸味	16.6	4.96	↓
19	酸类	79-09-4	$C_3H_6O_2$	丙酸		0.18	-	-
20	酸类	2564-95-6	$C_6H_{11}NO_3$	N,N-二甲基琥珀酸		-	0.11	+
21	酸类	62266-36-8	$C_5H_6O_2$	亚甲基环丙烷-2-羧酸		-	0.7	+
22	酸类	79-33-4	$C_3H_6O_3$	L-乳酸		-	30.43	+
23	酸类	142-62-1	$C_6H_{12}O_2$	己酸		0.68	-	-
24	酸类	57-10-3	$C_{16}H_{32}O_2$	棕榈酸	脂肪气味	0.42	-	-
25	醛类	96-17-3	$C_5H_{10}O$	2-甲基丁醛	发酵烘焙味	-	2.96	+
26	醛类	98-01-1	$C_5H_4O_2$	糠醛	甜木香、杏仁香、烤面包混合气味	16.19	28.08	↑
27	醛类	100-52-7	C_7H_6O	苯甲醛	杏仁	-	0.29	+
28	醛类	620-02-0	$C_6H_6O_2$	5-甲基呋喃醛	香料味	0.64	2.16	↑
29	醛类	122-78-1	C_8H_8O	苯乙醛	风信子气味	1.18	0.15	↓
30	醛类	116-26-7	$C_{10}H_{14}O$	藏红花醛	烟草味	-	0.12	+
31	醛类	67-47-0	$C_6H_6O_3$	5-羟甲基糠醛	霉味	20.32	6.5	↓
32	醛类	121-33-5	$C_8H_8O_3$	香兰素	强烈独特的香兰豆香	1.06	0.15	↓
33	醛类	124-25-4	$C_{14}H_{28}O$	十四烷醛	柑橘和鸢尾样的香气	0.1	-	-
34	醛类	823-82-5	$C_6H_4O_3$	2,5-二甲酰呋喃		0.59	-	-
35	醛类	54484-73-0	$C_{10}H_{22}O_2$	乙醛乙基己基缩醛	花香气味	-	0.14	+
36	酚类	95-71-6	$C_7H_8O_2$	甲基对苯二酚		0.13	-	-
37	酚类	7786-61-0	$C_9H_{10}O_2$	2-甲氧基-4-乙烯基苯酚	强烈香辛料、丁香和发酵似香气	0.13	-	-
38	酚类	96-76-4	$C_{14}H_{22}O$	2,4-二叔丁基酚		0.18	-	-
39	醇类	24347-58-8	$C_4H_{10}O_2$	(2R,3R)-(-)-2,3-丁二醇		0.11	-	-
40	醇类	513-85-9	$C_4H_{10}O_2$	2,3-丁二醇	黄油、奶油气味	3.03	0.79	↓
41	醇类	4412-91-3	$C_5H_6O_2$	3-呋喃甲醇		0.56	0.16	↓
42	醇类	98-00-0	$C_5H_6O_2$	糠醇		1.61	0.51	↓
43	醇类	107-88-0	$C_4H_{10}O_2$	1,3-丁二醇		-	1.06	+
44	醇类	60-12-8	$C_8H_{10}O$	苯乙醇	玫瑰香气	0.79	0.19	↓
45	醇类	19780-44-0	$C_8H_{18}O$	4-乙基-3-己醇		-	0.25	+
46	醇类	34995-77-2	$C_{10}H_{18}O_2$	反-A,A-5-三甲基-5-乙烯基四氢化-2-呋喃甲醇	木香花香香气	-	0.16	+
47	其他	1072-83-9	C_6H_7NO	2-乙酰吡咯	烧烤的味道	0.98	0.55	↓
48	其他	2882-21-5	$C_6H_8N_2O$	2-甲氧基-6-甲基吡嗪	烤榛子、杏仁、花生味	0.18	-	-
49	其他	1014-60-4	$C_{14}H_{22}$	1,3-二叔丁基苯		-	0.12	+
50	其他	103-50-4	$C_{14}H_{14}O$	二苄醚	甜果味、蘑菇、玫瑰气味	0.52	-	-
51	其他	6066-49-5	$C_{12}H_{14}O_2$	丁基苯酞	芹菜、香蕉	0.23	-	-
52	其他	551-08-6	$C_{12}H_{12}O_2$	3-正丁烯基苯酞	草本独活、芹菜气味	0.13	-	-
总计						90.61	90.03	

醛等成分的含量远高于发酵前的含量,这些物质增加了发酵覆盆子的木香、杏仁香、烘焙香气以及乳香和花香气味,构成了覆盆子发酵品的独特香气。本研究可降低加工成本,拓展覆盆子的应用范围,为发酵覆盆子的制作工艺提供依据,为覆盆子在健康功能食品领域中的进一步开发应用提供理论指导。

参考文献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[S]. 北京:中国医药科技出版社,2020:12.
[2] 顾观光. 神农本草经[M]. 北京: 人民卫生出版社,1955.
[3] 卢多逊. 开宝本草(辑复本)[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社,1998: 215.
[4] LUO T,MIRANDA - GARCIA O,ADAMSON A,et al. Development of obesity is reduced in high - fat fed mice fed whole raspberries, raspberry juice concentrate,and a combination of the raspberry phytochemicals ellagic acid and raspberry ketone[J]. Journal of Berry Research,2016,6(2) : 213 - 223.
[5] GIULIANA D,NORATTO,BOON P. Red raspberry (Rubus idaeus L.) intake decreases oxidative stress in obese diabetic (db/db) mice [J]. Food Chemistry,2017,227 : 305 - 314.
[6] SONG B B,ZHENG B S,LI T,et al. Raspberry extract promoted longevity and stress tolerance via the insulin/IGF signaling pathway and DAF - 16 in Caenorhabditis elegans [J]. Food & function,2020,11(4): 3598 - 3609.
[7] KULA MARTA,KRAUZE - BARANOWSKA MIROSŁAWA. Rubus occidentalis: The black raspberry - its potential in the prevention of cancer[J]. Nutrition and Cancer,2016,68(1) : 18 - 28.
[8] NAN SUN,YAN WANG,YUN LIU. A new ent - labbane diterpene saponin from the fruits of Rubus chingii[J]. Chemistry of Natural Compounds,2013,2013(1) : 44 - 47.
[9] 韩冰,林辉,陈佳,等. 覆盆子抗耐药真菌活性成分提取方法比较及活性部位初步筛选[J]. 中国真菌学杂志,2012,7(6): 326 - 329.
[10] 李亘. 中药覆盆子对体外培养视网膜神经节细胞保护作用的研究[D]. 沈阳: 辽宁中医药大学,2017.
[11] LIANG W Q,XU G J,WENG D,et al. Anti - Osteoporotic Components of Rubus chingii[J]. Chemistry of Natural Compounds,2015,51(1): 47 - 49.
[12] HAN N,GU Y H,YE C,et al. Antithrombotic activity of fractions and components obtained from raspberry leaves (Rubus chingii) [J]. Food Chemistry,2012,132(1): 181 - 185.
[13] 吕志豪,黄诗雨,陈丽华,等. 含覆盆子方剂组方规律及产品开发的研究进展[J]. 中成药,2022,44(1): 166 - 169.
[14] 管咏梅,屈宝华,王慧,等. 中药覆盆子及其成熟果实研究进展[J]. 中华中医药学刊,2023,41(1): 1 - 5.
[15] 予辑. 药食同源原料目录 (2017 版)[J]. 口腔护理用品工业,2017,27(6): 24 - 28.
[16] 郑明敏,李雪微,曾慧婷,等. 江西省道地药材“赣十味”“赣食十味”开发利用的 SWOT 分析与对策探讨[J]. 实用中西医结合临床,2024,24(3): 1 - 6,11.
[17] 倪以宇. 葛根 - 枳椇子药对发酵工艺优化及对酒精性肝损伤保护作用及机制研究[D]. 长春:长春中医药大学,2023.
[18] 朱会霞,孙金旭,李湘阳. 高效液相色谱法对比分析覆盆子果酒发酵前后有机酸变化[J]. 山东化工,2019,48(24): 70 - 71,74.
[19] 吴格格,任佑华,林威,等. 覆盆子保健乳酸菌饮料的研究[J]. 湖南农业科学,2014(15): 52 - 55.
[20] 鲁静,牛晓静,王梦珂,等. 基于 AHP - 熵权 TOPSIS 混合加权法和均匀设计法优化何首乌九蒸九制炮制工艺[J]. 中华中医药学刊,2023,41(7): 70 - 74.
[21] 史可,王春燕,王梦珂,等. 基于 AHP - 熵权 TOPSIS 混合加权法探究姜半夏化学成分与颜色的关联性[J]. 现代中药研究与实践,2023,37(5): 54 - 59.
[22] 李海松,杜娟,马彦江. 均匀设计法结合 AHP - 熵权 TOPSIS 混合加权法优化地黄九蒸九制炮制工艺[J]. 医药论坛杂志,2024,45(12): 1305 - 1310.
[23] 吴杨倩,周彤,谢颖,等. 基于 AHP - 熵权 TOPSIS 法优选磁石炮制工艺及所含重金属元素的风险评估[J]. 中草药,2024,55(14): 4679 - 4687.
[24] ZHANG L,TU Z C,XIE X,et al. Antihyperglycemic,antioxidant activities of two Acer palmatum cultivars,and identification of phenolics profile by UPLC - QTOF - MS/MS: New natural sources of functional constituents[J]. Industrial Crops & Products,2016,89 : 522 - 532.
[25] ZHENG Y T,LIU S A,XIE J H,et al. Antioxidant,α - amylase and α - glucosidase inhibitory activities of bound polyphenols extracted from mung bean skin dietary fiber[J]. LWT,2020(1):132.
[26] LI J I,LI W T,DENG Z Y,et al. Comparison of free,conjugated, and insoluble - bound phenolics and their antioxidant activities in oven - drying and freeze - drying bamboo (Phyllostachys edulis) shoot tips[J]. Journal of food science,2021,86(9): 4223 - 4243.
[27] 韩卓,陈晓燕,李延红,等. 顶空 - 气质联用法对覆盆子叶中挥发性成分的分析[J]. 食品与机械,2013,29(4): 11 - 13.
[28] 费永涛,黄一鹤,屈春云,等. 覆盆子乳酸菌饮料发酵工艺优化及挥发性风味物质分析[J]. 中国酿造,2023,42(7): 214 - 220.
[29] 马亚荣. 药用植物挥发性成分的 SHS/GC - MS 研究[D]. 西安: 西北大学,2017
[30] 陈雨迅,徐万爱,吴静雨,等. 基于 HS - GC - MS 分析建昌帮特色姜制星朴片炮制过程中挥发性成分的动态变化[J]. 中国实验方剂学杂志,2024,30(20): 127 - 134.
[31] 商杰,彭嘉玉,郑郁清,等. 基于电子鼻和 HS - GC - MS 技术结合相对气味活度值分析甘草不同炮制品气味差异及其物质基础[J]. 中国中药杂志,2024 ,49 (19): 5218 - 5228.
[32] 王佩欣,卢菲艳,张露,等. 不同产地覆盆子乙醇提取物中的酚类物质及其抗糖尿病活性[J]. 食品工业科技,2024,45(9): 280 - 287.
[33] 邬玉芬,吴俊,喻卫武. 覆盆子总黄酮超声波提取工艺响应面法优化及其抗氧化特性研究[J]. 浙江林业科技,2014,34(1): 23 - 27.
[34] 程丹,李洁,周斌,等. 覆盆子化学成分与药理作用研究进展[J]. 中药材,2012,35(11): 1873 - 1876.
[35] 师聪,解春芝,张建萍,等. 覆盆子不同极性溶剂提取物的抗氧化活性比较[J]. 食品科技,2021,46(1): 220 - 224.